Sobre os efeitos das correntes elétricas – Tradução comentada da primeira obra de Ampère sobre eletrodinâmica

Onthe effects of electric currents – Commented translation of Ampère's first work related to electrodynamics

JOÃO PAULO MARTINS DE CASTRO CHAIB

ANDRÉ KOCH TORRES ASSIS

Unicamp

RESUMO: Apresentamos a tradução comentada da primeira obra de A. M. Ampère sobre os fenômenos eletrodinâmicos. Neste artigo Ampère descreve suas observações da ação entre correntes elétricas e suas conseqüências qualitativas.

Palavras-chave: Ampère, eletrodinâmica, eletromagnetismo.

ABSTRACT: We present a commented Portuguese translation of the first work of A. M. Ampère related to the electrodynamic phenomena. In this article Ampère describes his observations of the action between electric currents and their qualitative consequences.

Key-words: Ampère, electrodynamics, electromagnetism.

Introdução

Esta é uma tradução do primeiro trabalho publicado por Ampère (1775-1836) voltado para a eletrodinâmica, intitulado "Sobre os efeitos das correntes elétricas". Esse trabalho foi lido nos dias 18 e 25 de setembro de 1820 para a Academia Real de Ciências da França e apresentado por escrito à Academia em 2 de outubro de 1820.[1] O texto nunca foi traduzido para o português. Mesmo para o inglês existe apenas uma tradução parcial realizada por O. M. Blunn.[2]

A continuação desse artigo também foi publicada em 1820.[3] Novamente há uma tradução parcial deste segundo artigo para o inglês, realizada por O. M. Blunn.[4] Essas duas traduções parciais dos dois artigos de Ampère estão combinadas em um único texto em inglês, o que dificulta a localização de onde termina o primeiro trabalho e onde começa o segundo. Além disso, foram omitidas traduções de trechos importantes desses artigos. A tradução do primeiro artigo para o português apresentada aqui é completa.

O fato que precedeu esse trabalho – e o motivou – foi uma observação crucial realizada em 1820 por Oersted (1777-1851), sendo anunciada por ele à comunidade científica em 21 de julho de 1820. Ele colocou um fio metálico paralelo a uma agulha magnética que estava orientada ao longo do meridiano magnético terrestre. Ao passar uma corrente elétrica constante no fio, observou que a agulha era defletida de sua direção original.[5] Tal descoberta foi descrita na Academia Real de Ciências da França em 4 de setembro de 1820 pelo então presidente Arago (1786-1853). Diante da descrença generalizada, repetiu a experiência de Oersted perante a Academia em 11 de setembro.[6] É importante notar o curto espaço de tempo entre a divulgação da experiência de Oersted e a apresentação dos primeiros trabalhos de Ampère na área, descritos nesta tradução. Sua excitação com as novas desco-bertas e sua dedicação ao assunto estão bem descritas em uma carta escrita para seu filho entre 19 e 25 de setembro:

> [...] me arrependo muito de não ter enviado esta carta há três dias [...], mas todo o meu tempo tem sido tomado por uma circunstância importante da minha vida. Desde que escutei falar pela primeira vez da bela descoberta do Sr. Oersted, professor em Copenhagen, acerca da ação das correntes galvânicas sobre a agulha imantada, tenho pensado nisso continuamente, não tenho feito outra coisa a não ser escrever uma grande teoria sobre esses fenômenos e sobre todos aqueles já conhecidos a respeito do ímã, e realizar as experiências indicadas por essa teoria, sendo que todas tiveram êxito e me fizeram conhecer vários fatos novos.[7]

Comentários

Ampère interpretou a experiência de Oersted como indicação de que deveriam existir interações diretas entre fios com corrente, sendo que um ímã comum teria correntes elétricas fluindo em seu interior e sobre sua superfície. Se este fosse o caso, ele poderia explicar a partir de um único princípio (ou seja, a força entre condutores com correntes) tanto os fenômenos já conhecidos há séculos de interação entre ímãs, quanto o fenômeno descoberto por Oersted do torque exercido por um fio com corrente sobre um ímã. E ainda conseguia imaginar um fenômeno novo ainda não observado por ninguém antes dele, a saber, a interação direta entre dois condutores com corrente. Ampère realizou essa experiência e conseguiu verificar esse efeito, dando assim origem à eletrodinâmica (um nome que ele cunhou mais tarde[8]), que descreve a força entre fios com corrente.

Apesar de Ampère admitir ter sido influenciado pela experiência de Oersted, a conclusão de que seja possível existir uma ação mútua entre circuitos elétricos a partir do experimento de Oersted não é simples e nem direta. Ampère deixou isso bem claro com um contra-exemplo citado em sua principal obra, publicada em 1826, *Teoria matemática dos fenômenos eletrodinâmicos deduzida unicamente da experiência*. Como mencionado por Ampère, um ímã interage com outro ímã e também com um pedaço de ferro doce, mas dois pedaços de ferro doce não interagem entre si:[9]

> Quando o Sr. Oersted descobriu a ação que o fio condutor exerce sobre um ímã, se devia, na verdade, ser levado a supor que poderia haver uma ação mútua entre dois fios condutores. Porém esta não seria uma conseqüência necessária da descoberta deste célebre físico, já que uma barra de ferro doce age também sobre uma agulha imantada e, contudo, não existe qualquer ação mútua entre duas barras de ferro doce. Enquanto somente se conhecia o fato da deflexão da agulha imantada pelo fio condutor, não se poderia supor que a corrente elétrica somente comunicava a este fio a propriedade de ser influenciado pela agulha de uma maneira análoga à maneira em que o ferro doce é [influenciado] por esta mesma agulha – o que seria suficiente para que ele agisse sobre ela – sem que para isso devesse resultar em alguma ação entre dois fios condutores quando eles se encontrassem fora de influência de qualquer corpo imantado? Somente a experiência podia decidir essa questão. Realizei-a no mês de setembro de 1820, e foi demonstrada a ação mútua entre os condutores voltaicos.

Ampère não só imaginou a possibilidade da ação entre os fios condutores com corrente, como realizou experiências minuciosas, observando, entre outros fenômenos, que quando as correntes em fios retos paralelos fluem no mesmo sentido, os fios se atraem, e quando fluem em sentidos opostos, eles se repelem.

Mas, antes de apresentar suas experiências, Ampère precisa definir os conceitos com os quais descreverá suas descobertas. E ele os define de uma maneira extremamente detalhada e precisa, utilizando exemplos empíricos para ilustrar e justificar seus argumentos.

Inicialmente clarifica o que entende por *tensão elétrica* e por *corrente elétrica*. Deve ser lembrado que nesta época não se conhecia nem mesmo a lei de Ohm (1789-1854). Essa lei é de 1826, relacionando a tensão aplicada *V*, a resistência *R* de um circuito e a corrente elétrica *I* na forma $V = RI$. Neste período de 1780 a 1830, estavam sendo estabelecidos e diferenciados claramente os conceitos de tensão, carga, capacitância, corrente, resistência, potencial elétrico etc.

Os fenômenos que Ampère relaciona dentro do conceito de tensão elétrica são os fenômenos eletrostáticos usuais, sendo alguns deles conhecidos desde a antiguidade. O âmbar e algumas outras substâncias atraem corpos leves quando são atritadas e fazem com que esses corpos se grudem nelas. Depois de algum tempo de contato, esses corpos leves passam a ser repelidos pela substância atritada, já que adquirem a mesma carga que o corpo atritado. O eletroscópio já era utilizado para indicar se algum corpo estava ou não carregado eletricamente, assim como o grau ou intensidade dessa eletrificação. As maneiras de gerar corpos carregados (ou tensão elétrica) já conhecidas na época de Ampère incluíam a carga por atrito mencionada acima, o simples contato sem atrito de metais diferentes (fenômeno descrito por Volta (1745-1827)), a polarização elétrica de alguns cristais como a turmalina ao serem aquecidos etc.

Os fenômenos que Ampère classifica como sendo devidos essencialmente à presença da corrente elétrica são a eletrólise (decomposição e separação de elementos químicos de um composto através da eletricidade) e a deflexão da agulha magnética na experiência de Oersted.

O conceito de corrente elétrica é desenvolvido de forma clara neste trabalho. Mas deve ser mencionado que essa expressão não foi criada por Ampère, já sendo utilizada, por exemplo, por Volta em 1800, no artigo em que descreve sua invenção da pilha elétrica.[10] Ampère se preocupa, em primeiro lugar, em distinguir de forma precisa os dois conceitos, associando a eles uma série de fenômenos em que apenas um destes conceitos, tensão ou corrente, explicaria os fatos empíricos. Ele abre mão de termos como "corrente galvânica", "galvanismo" ou mesmo "conflito elétrico".[11] Na corrente elétrica ele associa também um *sentido da corrente*, conceito extremamente útil para descrever com mais clareza os fenômenos observados.

Sua preocupação com as medidas o levou a sugerir a construção de um galvanômetro, instrumento para medir a direção e intensidade de uma corrente elétrica. Este é um nome criado por Ampère neste artigo que está sendo traduzido aqui. Mas ele só foi construído de fato por Pouillet (1790-1868) em 1837.[12] De qualquer forma, utilizando uma bússola sobre o circuito e sobre sua grande pilha voltaica, Ampère conseguiu observar o sentido das correntes elétricas tanto ao longo do condutor como no interior da pilha que usava.

Finalizando seu texto, Ampère deixa evidente que seu método de pesquisa é inspirado em Newton, ao afirmar que "na ação mútua de duas correntes elétricas, a ação diretriz e a ação atrativa ou repulsiva dependem de um mesmo princípio, e são apenas efeitos diferentes devidos a uma única e mesma ação". Deste modo ele faz uma escolha filosófica, ao utilizar uma pequena quantidade de conceitos para explicar um conjunto de fenômenos. Com isto Ampère chega ao seguinte raciocínio: se a interação

entre dois circuitos com corrente apresenta todas as características da interação entre dois ímãs, ou entre um ímã e um fio com corrente, porque haveriam de ser efeitos diferentes? Então conclui: "É assim que se chega a este resultado inesperado, de que os fenômenos magnéticos são produzidos unicamente pela eletricidade, e de que não há nenhuma outra diferença entre os dois pólos de um ímã, a não ser sua posição em relação às correntes que compõem o ímã."

Recepção do trabalho de Ampère

Entre as principais idéias de Ampère, encontra-se a suposição de que existem correntes elétricas no interior dos ímãs e da própria terra. Ele considerava a interação magnética entre dois ímãs, ou entre um ímã e a terra, como sendo devida a uma interação direta entre as correntes elétricas que existiriam no interior destes corpos. Da mesma maneira, interpretou a experiência de Oersted como indicação de uma interação direta entre a corrente no fio condutor e as correntes no interior da agulha imantada. Foi levado por essa interpretação, que Ampère buscou a existência de uma interação direta entre dois fios conduzindo correntes constantes, tendo encontrado o que buscava. Com isto unificou o tratamento das três classes de fenômenos (a saber, magnéticos, eletromagnéticos e eletrodinâmicos) dentro de um único ponto de vista, ou seja, todos eles seriam devidos a forças centrais de ação e reação entre condutores conduzindo correntes elétricas.

Embora essas idéias de Ampère estejam incorporadas na física atual, não foram aceitas em sua época por muitos cientistas importantes. Oersted, por exemplo, observou que a agulha imantada sofria um desvio de cerca de 45 graus em relação ao meridiano magnético quando a distância entre o fio e a agulha não excedia ¾ de polegada.[13] Para explicar esse desvio da agulha devido à corrente elétrica no fio (que ele chamava de conflito elétrico, com cargas positivas e negativas movendo-se em direções opostas ao longo do fio, encontrando-se e separando-se ao longo do circuito), ele supôs que o conflito não estava confinado ao fio condutor, mas se espalhava no espaço ao redor dele. Os corpos não magnéticos seriam permeáveis ao conflito elétrico, enquanto que os corpos ou partículas magnéticas resistiriam à passagem desse conflito, sendo movidas por ele. Ele então supõe que a matéria elétrica negativa segue uma hélice ao redor do fio, empurrando o pólo norte da agulha imantada, mas não agindo sobre o pólo sul. Já a matéria elétrica positiva seguiria a mesma hélice, mas em sentido oposto à matéria negativa, empurrando o pólo sul da agulha imantada, mas não agindo sobre o pólo norte. O motivo da hélice foi a inclinação da agulha, sendo que Oersted não considerava a influência magnética da terra sobre ela. A explicação que Oersted deu para sua experiência é então baseada em uma interação local entre as cargas elétricas circulando ao redor do fio e os pólos magnéticos da agulha imantada.

Já a explicação fornecida por Ampère é completamente diferente, sendo baseada em uma ação direta entre correntes elétricas. Para isto tinha de supor correntes elétricas circulando no interior de ímãs. Oersted nunca aceitou essa idéia, além de considerar esse modelo físico muito complicado e a matemática de Ampère muito complexa. Em uma carta escrita para sua esposa em 25 de abril de 1822, após ter se encontrado com Ampère em Paris, Oersted afirmou o seguinte:[14]

> Ampère, que tem trabalhado tanto com a minha descoberta e encontrou uma teoria muito elaborada sobre ela, ficou muito chateado por eu ainda preferir a minha teoria que é extremamente simples. Para ter uma conversa comigo sobre isso na presença de vários cientistas, ele convidou-me para um jantar no qual também estavam presentes Fourier, Dulong, Chevreul, Friedrich Cuvier, Savary e Montferrand. Os dois últimos são jovens discípulos

de Ampère. Após o jantar, começou a conversa, e esta durou por quase três horas. Tive sucesso em provar que a minha teoria explica todos os fenômenos e, o que foi mais notável, tive de provar a Fourier que a minha teoria era anterior à teoria de Ampère, contudo, foi fácil provar isso, visto que já a havia fornecido na minha primeira publicação. Mesmo os dois discípulos de Ampère declararam que a minha teoria era capaz de explicar todos os fenômenos. Eles afirmam que também a teoria de Ampère será capaz disso, e, como sua teoria não é nada mais do que o oposto da minha, tendo ele removido o circuito de forças, descoberto por mim, do condutor e o transferindo para o ímã, sem dúvida não será difícil encontrar qualquer objeção totalmente decisiva em relação à sua teoria, mas também não me importo com isso.

Em 1830, Oersted publica um artigo sobre termoeletricidade na Enciclopédia de Edimburgo, organizada por David Brewster (1781-1868), no qual firma:[15]

O Sr. Ampère, a quem devemos a descoberta das atrações e repulsões mútuas das correntes elétricas, considera como fundamental a lei desta ação, pelo menos até onde se estende nosso conhecimento atual. Assim ele não admite ação giratória na corrente elétrica, mas a transporta para o ímã, no qual supõe correntes elétricas, circulando em planos perpendiculares ou aproximadamente perpendiculares ao eixo do ímã. Inicialmente ele supôs que todas as correntes tinham seus centros no eixo, e estavam situadas em planos perpendiculares a este eixo, mas como ele logo descobriu que isto não representaria os fenômenos, supôs que cada átomo do ímã era cercado por correntes elétricas, ainda circulando em planos perpendiculares ao eixo do ímã. Contudo, quando o Sr. Poisson mostrou que em conseqüência deste ponto de vista o maior efeito de uma barra magnética estaria situado em sua extremidade, contrário à experiência, ele mudou essa suposição, e atualmente é de opinião que as correntes estão situadas em um plano um pouco inclinado em relação ao eixo do ímã.

Com essas suposições, e com um esforço considerável de talento matemático, conseguiu fazer com que esse ponto de vista representasse bem os fenômenos, embora sua teoria seja muito complicada.

Biot (1774-1862) e Savart (1791-1841) interpretaram a experiência de Oersted como demonstração de que a passagem da corrente elétrica pelo fio havia imantado o fio, que se comportaria então como um ímã comum, podendo interagir com outros ímãs:[16]

Com o auxílio desses procedimentos, os Srs. Biot e Savart foram conduzidos ao resultado seguinte, que exprime rigorosamente a ação experimentada por uma molécula de magnetismo austral ou boreal colocada a uma distância qualquer de um fio cilíndrico muito fino e indefinido, tornado magnético pela corrente voltaica. Trace uma perpendicular ao eixo do fio pelo ponto onde se localiza essa molécula. A força que atua sobre a molécula é perpendicular a essa linha e ao eixo do fio. Sua intensidade é inversamente proporcional à distância. A natureza de sua ação é a mesma que a ação de uma agulha imantada que fosse colocada sobre o contorno do fio em um sentido determinado e sempre constante em relação à direção da corrente voltaica; de tal maneira que uma molécula de magnetismo boreal e uma molécula de magnetismo austral seriam assim solicitadas em sentidos contrários, embora sempre seguindo a mesma [linha] reta determinada pela construção precedente.

Ou seja, em vez de considerar, como Ampère, uma interação direta entre elementos de corrente, Biot e Savart achavam que o fio havia sido imantado pela corrente elétrica, agindo então sobre os pólos magnéticos da agulha da bússola. Eles nunca chegaram a encontrar uma distribuição apropriada de pólos magnéticos ao longo da seção reta do fio com corrente que conseguisse reproduzir fielmente a orientação espacial da agulha da bússola em relação ao fio. Devido a isto passaram a explicar o fenômeno em termos de forças exercidas por cada elemento de corrente do fio sobre os pólos magnéticos da agulha da bússola. Essas forças não seriam mais de atração e repulsão ao longo da reta que une um elemento de corrente com um pólo magnético, mas seriam perpendiculares ao plano formado pela direção do elemento de corrente e pela reta, unindo o elemento de corrente ao pólo magnético. Depois de terem obtido que a força exercida por um longo fio retilíneo sobre um pólo magnético é inversamente proporcional à distância entre eles, tentaram obter a força exercida por um elemento de corrente sobre

um pólo magnético. A lei que expressa a suposta força exercida por cada elemento de corrente sobre um pólo magnético de um ímã foi expressa nas seguintes palavras por Biot:[17]

> *Assim, quando um fio conjuntivo indefinido, animado pela corrente voltaica, age sobre um elemento de magnetismo austral ou boreal situado a uma certa distância FA ou FB de seu centro, a resultante das ações que ele exerce é perpendicular à distância mais curta da molécula ao fio*. [...] Logo, a lei, assim interpretada, significa que *a ação total do fio conjuntivo sobre um elemento magnético qualquer, seja austral, seja boreal, é inversamente proporcional à distância retilínea deste elemento ao fio*. [...] A ação de um fio conjuntivo e retilíneo sobre um elemento magnético, tal como acabamos de obter pelas experiências precedentes, é apenas um resultado composto; pois, ao dividir em pensamento todo o comprimento do fio em uma infinidade de pedaços de um comprimento muito pequeno, vê-se que cada pedaço deve agir sobre a agulha com uma energia diferente, de acordo com a distância e de acordo com a direção segundo a qual sua ação é exercida. Ora, essas forças elementares são precisamente o resultado simples que é sobretudo importante de conhecer, pois a força total exercida pelo fio é apenas a soma aritmética de seus efeitos. Mas basta usar o cálculo para ir desta resultante à ação simples: é o que fez o Sr. Laplace. Ele deduziu matematicamente de nossas observações a lei de força exercida individualmente por cada pedaço do fio sobre cada molécula magnética que apresentamos a ele. Essa força está dirigida, como a ação total, perpendicularmente ao plano obtido pelo elemento longitudinal do fio, e pela distância mais curta desse elemento até a molécula magnética solicitada. Sua intensidade, como nas outras ações magnéticas, é inversamente proporcional ao quadrado dessa mesma distância.

Faltava ainda a dependência do ângulo entre o elemento de corrente e a reta que o liga à molécula magnética. Biot e Savart realizam uma nova experiência com um longo fio oblíquo na forma do sinal >, situado em um plano vertical, atuando sobre uma agulha magnética. Chamam de *i* ao ângulo formado entre o ramo inferior do fio e a horizontal. Na segunda edição do livro *Précis élémentaire de physique*, de 1821, Biot afirma o seguinte:[18]

> Encontrei assim que, tanto para o fio oblíquo quanto para o fio retilíneo, a ação era inversamente proporcional à distância, mas a intensidade absoluta era mais fraca para o fio oblíquo do que para o fio reto, na proporção do ângulo ZMH em relação à unidade. Esse resultado, analisado pelo cálculo, me pareceu indicar que a ação de cada elemento *ì* do fio oblíquo sobre cada molécula *m* de magnetismo austral ou boreal é inversamente proporcional ao quadrado de sua distância *ìm* até esta molécula, e proporcional ao seno do ângulo *mìM* formado pela distância *ìm* com o comprimento do fio.

Em 1823, Felix Savary (1797-1841), que havia sido aluno de Ampère na Escola Politécnica, mostrou que se a força de cada elemento de corrente sobre uma molécula magnética fosse proporcional a sen *mìM*, então a força do fio oblíquo de Biot e Savart deveria ser proporcional a tan (*i*/2), e não a sen *i*, como Biot havia afirmado. Biot e Savart refazem a experiência com mais cuidado e, na terceira edição do *Précis élémentaire de physique*, Biot passa a afirmar que as suas experiências indicam agora que a força do fio oblíquo sobre um pólo magnético é proporcional a tan (*i*/2), e não mais a sen *i*. Concluem então:[19]

> Agora, se consideramos um pequeno pedaço infinitamente fino de um fio semelhante, situado em *ì*, e que *ìm* ou *R* seja sua distância a uma partícula *m* de magnetismo, seja boreal ou austral, deduzimos de nossas primeiras experiências que a ação desse pedaço sobre a partícula é inversamente proporcional ao quadrado da distância *ìm*, multiplicada por uma função desconhecida do ângulo *mìM*, que designaremos aqui por *ù*. Só falta então procurar qual é a forma que é necessário dar a essa função, para que a soma total das ações assim exercidas sobre *m*, por todos os pedaços do fio, perpendicularmente ao plano *CMZ*, forme uma resultante proporcional a (tan(*i*/2))/*R*. Satisfaz-se a essa condição tomando sen *ù* como sendo a função procurada; o que torna a ação elementar de um pedaço qualquer proporcional a (sen *ù*)/R^2; e ao juntar a essa expressão, baseada na experiência, o conhecimento da direção absoluta da força, que é perpendicular ao plano formado por cada distância pela direção de cada elemento longitudinal do fio que se considera, pode-se obter pelo cálculo a resultante total da ação exercida por um fio ou por uma porção de fio qualquer, reta ou curva, limitada ou indefinida.

É a esta expressão que se dá o nome de lei de Biot-Savart. Ou seja, eles não consideravam um ímã como composto por correntes microscópicas. Em vez de falarem da interação direta entre elementos de corrente, como fazia Ampère, consideravam como elementar a força exercida por um elemento de corrente sobre uma molécula magnética, isto é, sobre um pólo magnético. Biot considerava a hipótese de Ampère ruim, pois ela "é em primeiro lugar nela mesma totalmente fora das analogias que nos apresentam todas as leis de atração".[20]

Também Michael Faraday (1791-1867) é crítico em relação à teoria de Ampère e a sua hipótese de correntes elétricas no interior dos ímãs. Em um artigo sobre a história do eletromagnetismo, publicado em 1821, ele se diz cético até mesmo em relação à realidade das correntes elétricas: "Não temos prova da materialidade da eletricidade, ou da existência de qualquer corrente através do fio."[21] Em uma carta encaminhada a G. de la Rive (1770-1834), em setembro de 1821, escreve:[22]

> (As experiências de Ampère sobre eletromagnetismo) são poucas, e teoria ocupa a maior parte do que A. Ampère publicou, e teoria em muitos pontos não apoiada por experiências quando estas tinham de ser fornecidas. Ao mesmo tempo, as experiências do Sr. Ampère são excelentes e sua teoria engenhosa, e quanto a mim havia pensado muito pouco sobre ela antes de a sua carta chegar, simplesmente por ser naturalmente cético sobre teorias filosóficas.

Assim como esses autores rejeitaram a teoria de Ampère, este rejeitou suas teorias. Em relação às idéias de Biot, afirma o seguinte em sua obra principal, *Teoria matemática dos fenômenos eletrodinâmicos deduzida unicamente da experiência*, nossas palavras entre colchetes:[23]

> Dois sistemas [compostos] de solenóides muito pequenos agirão então um sobre o outro, de acordo com minha fórmula [para a força entre dois elementos de corrente], como dois ímãs compostos de tantos elementos magnéticos quantos são os solenóides que se supõem nesses dois sistemas. Um desses sistemas agirá também sobre um elemento de corrente elétrica, assim como faz um ímã. Conseqüentemente, todos os cálculos e todas as explicações, fundadas tanto sobre a consideração de forças atrativas e repulsivas dessas moléculas em razão inversa dos quadrados das distâncias, quanto sobre a consideração de forças giratórias entre uma dessas moléculas e um elemento de corrente elétrica – sendo que acabo de indicar a lei admitida pelos físicos que não adotam minha teoria –, são necessariamente as mesmas, seja explicando os fenômenos que os ímãs produzem nesses dois casos, como eu por correntes elétricas, ou preferindo-se a hipótese de dois fluidos. Então não é nesses cálculos ou nessas explicações que se pode procurar nem as objeções contra a minha teoria, nem as provas a seu favor. As provas sobre as quais a suporto, resultam sobretudo de que ela reduz a um único princípio três tipos de ações [isto é, ímã interagindo com ímã, fio com corrente interagindo com ímã, e fio com corrente interagindo com outro fio com corrente] que o conjunto de fenômenos provam ser devidos a uma causa comum, e que não podem ser reduzidas de outra forma. Na Suécia, na Alemanha e na Inglaterra, se acreditou poder explicá-los apenas pelo fato da ação mútua entre dois ímãs, tal como Coulomb havia determinado. As experiências que nos oferecem os movimentos de rotações contínuas estão em contradição manifesta com esta idéia. Na França, os que não adotaram a minha teoria são obrigados a considerar os três gêneros de ação que reduzi a uma lei comum, como sendo três tipos de fenômenos absolutamente independentes entre si. Deve-se levar em conta, entretanto, que se poderia deduzir da lei proposta pelo Sr. Biot para a ação mútua entre um elemento de fio condutor e o que ele chama de uma molécula magnética, [a lei] estabelecida por Coulomb relativamente à ação entre dois ímãs, caso se admitisse que um desses ímãs é composto de pequenas correntes elétricas, tal como as correntes que concebo. Mas, então, por que não admitir que o outro [ímã] é composto da mesma forma, e [por qual motivo não] adotar, conseqüentemente, toda a minha maneira de ver?
>
> Além disso, embora o Sr. Biot tenha denominado de força elementar (*Precis élémentaire de physique*, volume II, p. 122 da segunda edição) aquela cujo valor e direção ele determinou para o caso onde um elemento de fio condutor age sobre cada uma das partículas de um ímã, está claro que não se pode considerar como verdadeiramente elementar nem uma força que se manifesta na ação entre dois elementos que não são de mesma natureza [como no caso da teoria de Biot em que um elemento de corrente age sobre uma molécula magnética], nem uma força que não age ao longo da linha reta que une os dois pontos entre os quais ela se exerce [como é o caso da força que Biot supõe existir entre um elemento de corrente e uma molécula magnética].

Em relação às idéias de Oersted e de Faraday, que aceitavam que alguma coisa material girava ao redor de um fio com corrente, fazendo com que as agulhas imantadas acompanhassem essa direção de giro, Ampère afirmou o seguinte em sua *Teoria matemática dos fenômenos eletrodinâmicos deduzida unicamente da experiência* (nossas palavras entre colchetes):[24]

> E o sábio ilustre [H. C. Oersted] que viu pela primeira vez os pólos de um ímã transladados pela ação de um fio condutor em direções perpendiculares à direção do fio concluiu que a matéria elétrica girava em torno deste e empurrava os pólos no sentido de seu movimento, precisamente como Descartes girava a matéria de seus turbilhões no sentido das revoluções planetárias. Guiado pelos princípios da filosofia newtoniana, reduzi o fenômeno observado pelo Sr. Oersted – como se fez com respeito a todos os fenômenos do mesmo gênero que nos oferece a natureza – às forças agindo sempre ao longo da reta que une as duas partículas entre as quais as forças se exercem. E se estabeleci que a mesma disposição ou o mesmo movimento da eletricidade que existe em um fio condutor ocorre também em torno das partículas do ímã, certamente não é para fazê-las agir por impulso à maneira de um turbilhão, mas para calcular, a partir de minha fórmula [para a força entre elementos de corrente], as forças que resultam entre essas partículas e as partículas de um condutor ou de um outro ímã – seguindo as retas que ligam duas a duas as partículas entre as quais se considera a ação mútua – e para mostrar que os resultados dos cálculos são completamente verificados [...].

Conclusão

Este é um dos trabalhos mais marcantes da história do eletromagnetismo. Nele Ampère descreve uma nova classe de fenômenos, a saber, a interação direta entre dois fios condutores conduzindo correntes constantes. A esta classe de fenômenos, Ampère deu o nome de"eletrodinâmica".

Segue a tradução do trabalho de Ampère"Sobre os efeitos das correntes elétricas". Tanto as notas do autor [N. A.] como as dos tradutores [N. T.] encontram-se no final do trabalho. Nas notas do autor, indicamos qual é o número da nota no original para facilitar sua identificação pelo leitor. Isto é, usamos [N. A. m] para indicar a nota "m" de Ampère. As palavras entre colchetes no meio do texto são dos tradutores, incluídas para facilitar a compreensão de algumas frases. Também colocamos entre colchetes o início de cada página do original.

Tradução

[Pág. 59]

Memória apresentada à Academia Real de Ciências, em 2 de outubro de 1820, onde se encontra compreendido o resumo do que tinha sido lido à mesma Academia nos dias 18 e 25 de setembro de 1820, sobre os efeitos das correntes elétricas.

I. Sobre a ação mútua de duas correntes elétricas.

1. A ação eletromotriz[25] manifesta-se por dois tipos de efeitos que devo, em primeiro lugar, distinguir por uma definição precisa.

Chamarei o primeiro de *tensão elétrica*, e o segundo de *corrente elétrica*.

O primeiro efeito é observado quando os dois corpos entre os

[Pág. 60]

quais a ação eletromotriz[26] se estabelece são separados um do outro[27] por corpos não-condutores sobre todos os pontos das suas superfícies, salvo onde a tensão é estabelecida; o segundo efeito é aquele em que, pelo contrário, os dois corpos fazem parte de um circuito de corpos condutores que os fazem se comunicar por pontos das suas superfícies, que são diferentes dos pontos onde se produz esta ação.[28, 29] No primeiro caso, o efeito da ação eletromotriz põe os dois corpos, ou os dois sistemas de corpos entre os quais ela existe, em dois estados de tensão cuja diferença é constante quando esta ação é constante – quando, por exemplo, é produzida pelo contato de duas substâncias de natureza diferente – ou, ao contrário, esta diferença será variável com a causa que a produz – se ela é devida a uma fricção ou a uma pressão.[30]

Este primeiro caso é o único que pode se estabelecer quando a ação eletromotriz desenvolve-se entre as diversas partes de um mesmo corpo não-condutor; a turmalina oferece um exemplo quando ela altera sua temperatura.[31]

No segundo caso, não há mais tensão elétrica, os corpos leves não são mais perceptivelmente atraídos, e o eletrômetro comum não serve mais para indicar o que

[Pág. 61]

se passa no corpo; contudo a ação eletromotriz continua a agir; pois se a água, por exemplo, um ácido, um álcali ou uma solução salina fizer parte do circuito, estes corpos são decompostos, sobretudo quando a ação eletromotriz for constante, como há muito tempo se sabe; e, além disso, assim como o Sr. Oersted acaba de descobrir, quando a ação eletromotriz é produzida pelo contato dos metais, a agulha imantada é desviada da sua direção quando é colocada perto de uma porção qualquer do circuito; mas estes efeitos cessam, a água não se decompõe mais, e a agulha retorna à sua posição original quando se interrompe o circuito, quando as tensões se restabelecem, e quando os corpos leves são outra vez atraídos, o que prova efetivamente que estas tensões não são a causa da decomposição da água, nem das mudanças de direção da agulha imantada descobertas pelo Sr. Oersted. Este segundo caso é evidentemente o único que poderia existir se a ação eletromotriz se desenvolvesse entre as diversas partes de um mesmo corpo condutor. As conseqüências deduzidas, nesta Memória, das experiências do Sr. Oersted levar-nos-ão a reconhecer a existência desta [segunda] circunstância como a única explicação que temos de admitir no momento para o que acontece.

2. Vejamos agora a que se deve a diferença destas duas ordens de fenômenos inteiramente distintos, em que um [tipo de fenômeno] consiste na tensão e nas atrações ou repulsões conhecidas há muito tempo, e o outro [tipo de fenômeno consiste] na decomposição da água e de um grande número de outras substâncias, nas mudanças de direção da agulha [imantada] e em uma espécie de atrações e repulsões muito

[Pág. 62]

diferentes das atrações e repulsões elétricas comuns, as quais creio ter sido o primeiro a reconhecer e que nomearei *atrações e repulsões das correntes elétricas*,[32] para distingui-las destas últimas. No momento em que não há continuidade de condutores de um dos corpos ou dos sistemas de corpos entre os quais

se desenvolve a ação eletromotriz, e que estes corpos são eles mesmos condutores, como na pilha de Volta, só se pode conceber esta ação como levando constantemente a eletricidade positiva em uma [direção] e a eletricidade negativa na outra [direção]. No primeiro momento, quando nada se opõe ao efeito que [a ação eletromotriz] tende a produzir, as duas eletricidades acumulam-se, cada uma, na parte do sistema total para o qual são levadas; mas este efeito cessa logo que a diferença das tensões elétricas[33] fornece à atração mútua, que tende a reuni-las, uma força suficiente para equilibrar a ação eletromotriz. Então tudo fica neste estado, salvo pela perda de eletricidade que pode existir gradualmente através do corpo não-condutor – por exemplo, o ar que interrompe o circuito – pois parece que não existem corpos que sejam absolutamente isolantes. À medida que ocorre esta perda, a tensão diminui; mas tão logo ela diminui, a atração mútua das duas eletricidades deixa de equilibrar a ação eletromotriz, esta última força,

[Pág. 63]

se for constante, leva outra vez eletricidade positiva para um lado e eletricidade negativa para o outro lado, e as tensões restabelecem-se. É este estado de um sistema de corpos eletromotores e condutores que chamo de *tensão elétrica*. Sabe-se que [esta tensão] subsiste nas duas metades deste sistema, quer quando se venha a separá-las, quer no caso mesmo em que permaneçam em contato depois que a ação eletromotriz cessou, contanto que ela existisse então por pressão ou por fricção entre corpos que não sejam ambos condutores. Nestes dois casos, as tensões diminuem gradualmente devido à perda de eletricidade da qual falávamos agora mesmo.

Mas, quando os dois corpos ou os dois sistemas de corpos entre os quais a ação eletromotriz se estabelece estão em comunicação através de corpos condutores entre os quais não haja outra ação eletromotriz igual e oposta à primeira, a qual manteria o estado de equilíbrio elétrico e, por conseguinte, as tensões daí resultantes, estas tensões desaparecem, ou pelo menos se tornam muito pequenas, produzindo-se os fenômenos indicados acima, que caracterizam este segundo caso.[34] Porém, como não se alterou nada no arranjo dos corpos entre os quais se desenvolvia a ação eletromotriz, não se pode duvidar de que ela continue a agir, e, como a atração mútua de duas eletricidades, medida pela diferença das tensões elétricas que se tornou nula ou diminuiu consideravelmente, não pode mais equilibrar esta ação, geralmente se está de acordo que ela continua a levar as duas eletricidades nos dois sentidos para onde as levava anteriormente.

[Pág. 64]

De modo que resulta uma dupla corrente, uma de eletricidade positiva, outra de eletricidade negativa, partindo em sentidos opostos dos pontos onde a ação eletromotriz se estabelece, e indo reunir-se na parte do circuito oposta a estes pontos.[35] As correntes das quais falo vão acelerando-se até que a inércia dos fluidos elétricos[36] e a resistência que sofrem pela imperfeição [presente] mesmo nos melhores condutores, equilibrem-se com a força eletromotriz, após isto elas continuam indefinidamente com uma velocidade constante enquanto esta força conservar a mesma intensidade; mas cessam sempre no momento em que o circuito é interrompido. É a este estado da eletricidade [existente] em uma série de corpos eletromotores e condutores, que nomearei, para abreviar, de *corrente elétrica*. E como mencionarei freqüentemente os dois sentidos opostos em que se movem as duas eletricidades, subentenderei a cada vez que aparecer esta questão, para evitar uma repetição fastidiosa, que vinculada

às palavras *sentido da corrente elétrica* tem-se [o sentido da] *eletricidade positiva*.[37] De modo que ao falar, por exemplo, da pilha voltaica, a expressão *direção da corrente elétrica dentro da pilha* designará a direção que vai da extremidade onde o hidrogênio liberta-se na decomposição da água, para onde se obtém o oxigênio; já a expressão *direção da corrente elétrica no condutor que estabelece a comunicação entre as duas extremidades da pilha* designará a direção que vai, ao contrário, da extremidade onde se produz o oxigênio para onde se desenvolve o hidrogênio. Para abranger estes dois casos em uma só definição, pode-se dizer que nomearemos a direção da corrente elétrica aquela que

[Pág. 65]

segue o hidrogênio e as bases dos sais, quando a água ou uma substância salina fizer parte do circuito e for decomposta pela corrente, seja quando estas substâncias fazem parte do condutor [ligado] em uma pilha voltaica, ou quando elas se encontram interpostas entre os pares que compõem a pilha.

As pesquisas científicas dos Srs. Gay-Lussac e Thenard[38] sobre este aparelho – fonte fecunda das maiores descobertas em quase todos os ramos das ciências físicas – demonstraram que a decomposição da água, dos sais, etc. de modo algum é produzida pela diferença de tensão das duas extremidades da pilha, mas unicamente pelo que chamo de *corrente elétrica*, dado que, mergulhando na água pura os dois fios condutores, a decomposição é quase nula; enquanto que, sem nada alterar a disposição do resto do aparelho, ao misturar um ácido ou uma solução salina na água onde os fios estão mergulhados, [observa-se que] esta decomposição torna-se muito rápida, porque a água pura é um mau condutor, mas ela conduz bem a eletricidade quando é misturada com certa quantidade destas substâncias.

Ora, é bem evidente que a tensão elétrica das extremidades dos fios que mergulham no líquido não seria aumentada no segundo caso; ela pode apenas ser diminuída na medida em que este líquido torna-se melhor condutor. O que aumenta neste caso é a corrente elétrica. Portanto, a decomposição da água e dos sais é devida somente à corrente elétrica. É fácil de constatar também que somente ela age sobre a agulha imantada

[Pág. 66]

nas experiências do Sr. Oersted. Para isso é suficiente que se coloque uma agulha imantada sobre uma pilha horizontal alinhada aproximadamente com a direção do meridiano magnético. Enquanto as extremidades da pilha não se comunicarem, a agulha conservará a sua direção original. Mas no caso de se prender a uma das extremidades um fio metálico, e de se colocar a outra extremidade [do fio] em contato com a outra extremidade da pilha, a agulha muda de repente de direção e permanece na sua nova posição enquanto durar o contato e a pilha conservar sua energia. Apenas à medida que [a pilha] perde esta energia, a agulha se aproxima de sua direção original. No momento em que cessa a corrente elétrica, interrompendo a comunicação, a agulha retorna instantaneamente [à sua posição original ao longo do meridiano magnético terrestre]. Contudo é esta mesma conexão que faz cessar ou diminuir consideravelmente as tensões elétricas. Portanto, não podem ser estas tensões, mas apenas a corrente que influencia a direção da agulha imantada. Quando a água pura faz parte do circuito, e a decomposição é pouco perceptível, a agulha imantada disposta acima ou abaixo de uma outra porção do circuito também é pouco desviada. Quando se mistura ácido nítrico a esta água, sem nada alterar de resto o aparelho, aumenta este desvio ao mesmo tempo em que torna mais rápida a decomposição da água.

3. O eletrômetro corriqueiro indica quando há tensão e a intensidade desta tensão. Faltava um instrumento que indicasse a presença da corrente elétrica em uma pilha ou em um condutor, assim como sua energia e direção. Este instrumento existe hoje; é suficiente que a pilha ou uma porção qualquer do

[Pág. 67]

condutor seja colocada horizontalmente perto da direção do meridiano magnético [terrestre], e que um aparelho semelhante a uma bússola, que difere apenas pelo uso que lhe destinamos, seja posto sobre a pilha, ou mesmo abaixo ou acima desta porção do condutor. Enquanto existir qualquer interrupção no circuito, a agulha imantada permanece na sua situação ordinária; mas ela se afasta desta situação logo que a corrente se estabelece, tanto mais quanto maior for a energia [da pilha], e ela nos fornece a direção [da corrente] de acordo com este fato geral: se nos imaginarmos dispostos na direção da corrente, de modo que a corrente esteja dirigida dos pés à cabeça do observador, e que este tenha a face voltada para a agulha; é constantemente para a sua esquerda que a ação da corrente afastará de sua posição original a extremidade [da agulha] que se dirige para o norte [geográfico terrestre], e que chamarei sempre de *pólo austral da agulha imantada*, porque é o pólo homólogo ao pólo [magnético] austral da terra.[39] É isto que exprimirei mais resumidamente, dizendo que o pólo austral da agulha é levado para a esquerda da corrente que age sobre a agulha. Penso que, para distinguir este instrumento do eletrômetro usual, deve-se lhe dar o nome de *galvanômetro*, e que convém empregá-lo em todas as experiências sobre correntes elétricas, da mesma forma que se adapta habitualmente um eletrômetro às máquinas elétricas, a fim de ver a cada instante se existe corrente e qual é a sua energia.

O primeiro uso que fiz deste instrumento foi o de constatar que a corrente que existe dentro da pilha voltaica, da extremidade negativa para a extremidade positiva, tinha sobre a agulha imantada a mesma

[Pág. 68]

influência que possui a corrente do condutor, que vai, ao contrário, da extremidade positiva para a negativa.

É bom ter para isso duas agulhas imantadas, uma disposta sobre a pilha e outra acima ou abaixo do condutor. Vê-se o pólo austral de cada agulha desviar-se para a esquerda da corrente junto da qual está colocada a agulha; de modo que quando a segunda agulha está acima do condutor, ela é desviada do lado oposto daquele que tende a agulha posta sobre a pilha, porque as correntes têm direções opostas nestas duas porções do circuito. As duas agulhas são, ao contrário, levadas para o mesmo lado, permanecendo aproximadamente paralelas entre elas, quando uma está acima da pilha e a outra abaixo do condutor.[40] Logo que se interromper o circuito, elas retornam imediatamente, nos dois casos, às suas posições originais.[41]

4. Tais são as diferenças reconhecidas antes de mim entre os efeitos produzidos pela eletricidade nos dois estados [de tensão e de corrente] que acabo de descrever, sendo que um dos estados consiste senão no descanso, pelo menos em um movimento lento e produzido somente pela dificuldade em isolar completamente os corpos onde se manifesta a tensão elétrica; o outro estado consiste em uma dupla corrente de eletricidade positiva e negativa ao longo de um

[Pág. 69]

circuito contínuo feito de corpos condutores. Concebe-se, então, na teoria corriqueira da eletricidade, que os dois fluidos dos quais se considera como sendo composta a corrente são incessantemente separados um do outro em uma parte do circuito e levados rapidamente em sentido contrário para outra parte do mesmo circuito onde se reúnem continuamente.[42] Embora a corrente elétrica assim definida possa ser produzida por uma máquina [eletrostática] comum, dispondo-a de maneira a produzir as duas eletricidades, e ao ligar por um condutor as duas partes do aparelho onde se produzem as duas eletricidades, não se pode, a menos que tenhamos máquinas muito grandes, obter esta corrente com certa energia, a não ser com a ajuda de uma pilha voltaica, porque a quantidade de eletricidade produzida pela máquina de atrito continua a ser a mesma em um tempo dado, qualquer que seja a capacidade condutora do resto do circuito, enquanto que a quantidade de eletricidade posta em movimento pela pilha durante um mesmo tempo cresce indefinidamente à medida que se ligam as duas extremidades da pilha com um melhor condutor.

Mas as diferenças que acabo de descrever não são as únicas que distinguem estes dois estados da eletricidade. Descobri diferenças mais notáveis ainda dispondo, em direções paralelas, duas partes retilíneas de dois fios condutores que se ligam às extremidades de duas pilhas voltaicas. Uma parte era fixa, e a outra, suspensa sobre as pontas e tornada altamente móvel por um contrapeso, podia se aproximar ou se afastar [da primeira parte] conservando o seu paralelismo em relação à primeira parte.[43] Observei, então, que, passando ao mesmo tempo uma corrente elétrica em cada uma destas partes, elas se atraíam mutuamente quando as duas correntes estavam no

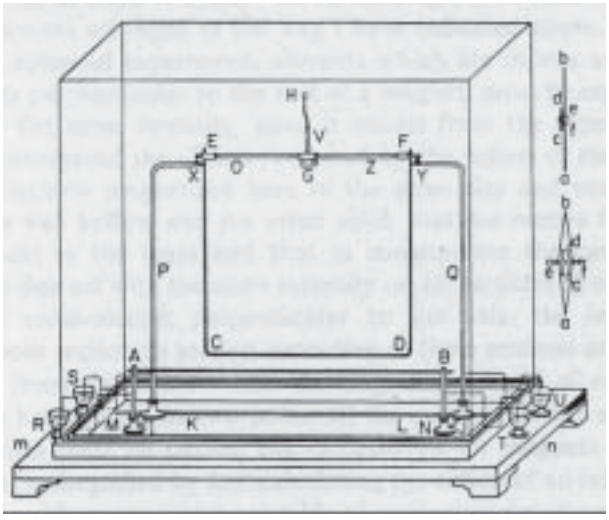
[Pág. 70]

mesmo sentido e que se repeliam quando fluíam em direções opostas.

Ora, estas atrações e repulsões das correntes elétricas diferem essencialmente das atrações e repulsões produzidas pela eletricidade no estado de repouso. Em primeiro lugar, elas cessam da mesma forma que terminam as decomposições químicas, no momento em que se interrompe o circuito dos corpos condutores. Em segundo lugar, nas atrações e repulsões elétricas ordinárias, são as eletricidades de tipos opostos que se atraem, e as que possuem o mesmo nome se repelem. Nas atrações e repulsões de correntes elétricas, ocorre precisamente o contrário. Quando os dois fios condutores são colocados paralelamente [entre si], de modo que as extremidades [das pilhas] de mesmo nome se encontrem no mesmo lado e muito perto uma da outra, é que existe atração. E existe repulsão quando as correntes nos dois condutores, sendo sempre paralelos, fluem em sentidos opostos, de modo que as extremidades [das pilhas] de mesmo nome se encontrem à maior distância possível. Em terceiro lugar, no caso em que ocorre atração – e que esta é forte o suficiente para trazer o condutor móvel em contato com o condutor fixo[44] – [os condutores] permanecem unidos como dois imãs, e não se separam imediatamente, como acontece com dois corpos condutores que se atraem porque estão eletrizados, um positivamente e o outro negativamente, que vêm a se tocar.[45] Por último, e parece que esta última circunstância tem a mesma causa que a precedente, duas correntes elétricas se atraem ou se repelem tanto no vazio como no ar; o que é outra vez contrário ao que se observa geralmente na ação mútua de dois corpos condutores eletrizados[46]

[Pág. 71]

da maneira usual. Não se trata aqui de explicar estes novos fenômenos – as atrações e repulsões que existem entre duas correntes paralelas, estando direcionados no mesmo sentido ou sentido oposto – [pois] são fatos dados por uma experiência fácil de repetir. É necessário colocar o aparelho sob um recipiente de vidro – a fim de evitar nesta experiência os movimentos que as pequenas agitações do ar imprimem ao condutor móvel – sob o qual se faz passar, no pedestal que o suporta, as porções dos condutores que devem se comunicar com as duas extremidades da pilha. A disposição mais cômoda destes condutores é colocar um condutor sobre dois apoios em uma posição horizontal onde ficará imóvel, e suspender o outro por dois fios metálicos que se ligam a ele, a um eixo de vidro que se encontra acima do primeiro condutor, e que repousa, por pontas de aço muito finas, sobre dois outros apoios de metal. Estas pontas [de aço] são soldadas às duas extremidades dos fios metálicos dos quais acabo de falar; de modo que o contato é estabelecido pelos apoios através destas pontas. (Veja a Fig 1).



Os dois condutores encontram-se assim paralelos [entre si], e ao lado um do outro, em um mesmo plano horizontal. Um deles é móvel pelas oscilações que pode fazer ao redor da linha horizontal que passa pelas extremidades das duas pontas de aço, e, neste movimento, permanece necessariamente paralelo ao condutor fixo.

Acrescenta-se acima e no meio do eixo de vidro um contrapeso, para aumentar a mobilidade da parte

[Pág. 72]

do aparelho suscetível de oscilar, levantando o centro de gravidade.

Acreditava primeiramente que seria necessário estabelecer a corrente elétrica nos dois condutores através de duas pilhas diferentes; mas isto não é necessário: é suficiente que ambos condutores façam parte do mesmo circuito, porque a corrente existe por toda parte com a mesma intensidade. Deve-se concluir desta observação que as tensões elétricas das duas extremidades da pilha não são em absoluto os fenômenos dos quais devemos nos ocupar, porque certamente não há tensão no resto do circuito. Isto é ainda confirmado pela possibilidade de mover a agulha imantada

[mesmo] a uma grande distância da pilha, [e] através de um condutor [com corrente] bastante extenso, cuja parte central se direciona ao longo do meridiano magnético acima ou abaixo da agulha. Esta experiência me foi sugerida pelo cientista famoso[47], a quem as ciências físico-matemáticas devem, sobretudo, os grandes progressos que têm feito hoje em dia. Esta experiência teve êxito completo.

Designemos por *A* e *B* as duas extremidades do condutor fixo, por *C*, a do condutor móvel que está do lado de *A*, e, por *D*, a do mesmo condutor [móvel] que está ao lado de *B*. É claro que se uma das extremidades da pilha for posta em contato com *A*, se *B* [for posto em contato] com *C*, e *D*, com a outra extremidade da pilha; a corrente elétrica fluirá no mesmo sentido nos dois condutores; então se verá os condutores se atraírem. E se, ao contrário, *A* sempre entrar em contato com uma extremidade da pilha, *B* se comunicar com *D*, e *C* com a outra extremidade da pilha; a corrente fluirá em sentidos opostos nos dois condutores,

[Pág. 73]

e então eles se repelirão. Ao se conceber, além disso, que as atrações e repulsões das correntes elétricas ocorrem em todos os pontos do circuito, é possível, com apenas um condutor fixo, atrair e repelir tantos condutores quantos se queira, e fazer variar a direção de tantas agulhas imantadas quantas se queira. Proponho-me a construir dois condutores móveis sob um mesmo recipiente de vidro, de forma que, ao se tornarem, juntamente com um condutor fixo comum, parte de um mesmo circuito, os condutores móveis sejam alternadamente os dois atraídos, os dois repelidos, ou um atraído e o outro repelido ao mesmo tempo, de acordo com a maneira com a qual estabelecemos os contatos. Depois do sucesso da experiência que me foi sugerida pelo Sr. marquês de Laplace, poder-se-ia – a partir de tantos fios condutores e de agulhas imantadas quantas são as letras [do alfabeto], ao colocar cada letra sobre uma agulha diferente, estabelecer, com a ajuda de uma pilha colocada distante destas agulhas, a qual ligamos alternadamente por suas duas extremidades às extremidades de cada condutor – formar uma espécie de telégrafo apropriado para escrever todos os detalhes que se queira transmitir, através de quaisquer obstáculos que possam existir [entre a pilha e as agulhas imantadas], à pessoa encarregada de observar as letras colocadas sobre as agulhas. Ao colocar sobre a pilha um teclado cujas teclas teriam [sobre elas] as mesmas letras e estabeleceriam o contato [elétrico] ao serem pressionadas, este meio de correspondência poderia existir com bastante facilidade e necessitaria apenas do tempo necessário para tocar de um lado e ler cada letra do outro lado.[48]

[Pág. 74]

Se o condutor móvel, em vez de estar sujeito a mover-se paralelamente [em relação] ao condutor que está fixo, puder apenas girar em um plano paralelo a este condutor fixo, em torno de uma [linha] perpendicular comum que passa pelos centros [dos dois condutores], é claro que, de acordo com a lei que acabamos de reconhecer para as atrações e repulsões das correntes elétricas, cada metade dos dois condutores se atrairá e se repelirá ao mesmo tempo, conforme as correntes estejam no mesmo sentido ou em sentidos opostos. Conseqüentemente, o condutor móvel irá girar até se tornar paralelo àquele que está fixo, de modo que as correntes se dirijam no mesmo sentido. Daqui segue que na ação mútua de duas correntes elétricas, a ação diretriz e a ação atrativa ou repulsiva dependem de um mesmo princípio, e são apenas efeitos diferentes devidos a uma única e mesma ação. Portanto, já não é mais necessário estabelecer entre estes dois efeitos a distinção que é tão importante de se fazer, como veremos

logo em seguida, quando se trata da ação mútua entre uma corrente elétrica e um ímã considerado, como o fazemos geralmente, em relação ao seu eixo, porque nesta ação os dois corpos tendem a dispor-se em direções perpendiculares entre si.

Passamos agora ao estudo desta última ação e ao estudo da ação de dois ímãs um sobre o outro.

[Pág. 75]

Veremos, então, que elas recaem na lei de ação mútua de correntes elétricas, se for suposto que uma destas correntes é estabelecida em cada ponto de uma linha traçada sobre a superfície de um ímã, de um pólo ao outro, em planos perpendiculares ao eixo deste ímã. Não me parece possível, de acordo com os fatos, duvidar de que tais correntes realmente existam ao redor do eixo dos ímãs, ou, de preferência, que a magnetização [dos ímãs] consista apenas no procedimento pelo qual se dá às partículas do aço a propriedade de produzir, no sentido das correntes das quais acabamos de falar, a mesma ação eletromotriz que se encontra na pilha voltaica, no óxido de zinco dos mineralogistas, na turmalina aquecida, e mesmo em uma pilha formada de cartões umedecidos e de discos de um mesmo metal a duas temperaturas diferentes. Mas como esta ação eletromotriz se desenvolve no caso do ímã entre as diferentes partículas de um mesmo corpo, bom condutor, ela nunca poderá, como observamos mais acima, produzir qualquer tensão elétrica, mas apenas uma corrente contínua semelhante à que existe em uma pilha voltaica conectada a ela própria formando uma curva fechada. É bem evidente, de acordo com as observações precedentes, que tal pilha não poderia produzir em nenhum dos seus pontos nem tensões nem atrações ou repulsões elétricas comuns, nem fenômenos químicos, dado que é então impossível introduzir um líquido no circuito; mas que a corrente que estabeleceria imediatamente nesta pilha agiria para orientar, atrair ou repelir uma outra corrente elétrica,

[Pág. 76]

ou um ímã que, como vamos ver, é apenas uma combinação de correntes elétricas.

É assim que se chega a este resultado inesperado, de que os fenômenos magnéticos são produzidos unicamente pela eletricidade, e de que não há nenhuma outra diferença entre os dois pólos de um ímã, a não ser sua posição em relação às correntes que compõem o ímã, de modo que o pólo austral[49] seja o que se encontra à direita destas correntes, e o pólo boreal se encontra à esquerda.

NOTAS E REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

João Paulo M. de C. Chaib é doutorando em física no Instituto de Física Gleb Wataghin da Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, e-mail: jopachaib@yahoo.com.br. *Ele agradece à Funcamp – Unicamp pelo apoio financeiro concedido através da bolsa de doutorado.*

André K. T. Assis, doutor em física, é professor do Instituto de Física Gleb Wataghin da Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, e-mail: assis@ifi.unicamp.br; homepage: http://www.ifi.unicamp.br/~assis.

1 *AMPÈRE*, A.-M. Mémoire présentéà l'Académie royale des Sciences, le 2 octobre 1820, où se trouve compris le résumé de ce qui avait été lu à la même Académie les 18 et 25 septembre 1820, sur les effets des courants électriques. Annales de Chimie et de Physique, v. 15, p. 59-76, 1820. Disponível em: <http://www.ampere.cnrs.fr/>. Acesso em 21 mar. 2007.

2 AMPÈRE, A.-M. Dissertation of M. Ampère. Traduzido do francês para o inglês por O. M. Blunn. In: TRICKER, R. A. R. Early Electrodynamics – The First Law of Circulation. Oxford: Pergamon Press, 1965, p. 140-146. Esta é uma tradução parcial do trabalho de AMPÈRE, A.-M., publicado em Annales de Chimie et de Physique, v. 15, p. 59-76, 1820.

3 AMPÈRE, A.-M. Suite du Mémoire sur l'Action mutuelle entre deux courans électriques, entre un courant électrique et un aimant ou le globe terrestre, et entre deux aimans. In: Annales de Chimie et de Physique, v. 15, p. 170-218, 1820.

4 AMPÈRE, op. cit., 1965, p. 146-154 [1820, p. 170-218].

5 ØRSTED, H. C. Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha

magnética. In: Cadernos de História e Filosofia da Ciência, v. 10, p. 115-122 (1986). Tradução de R. de A. Martins.

6 HOFMANN, J. R. André-Marie Ampère – Enlightenment and Electrodynamics, Cambridge: Cambridge University Press, 1996. p. 231 e 236; e TRICKER, op. cit., p. 23.

7 Carta L590, de 19/9/1820, disponível em: <http://www.ampere.cnrs.fr/amp-corr590.html>. Acesso em 21 mar. 2007.

8 AMPÈRE, A.-M. Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électro-dynamiques. In: Annales de Chimie et de Physique, v. 20, p. 60-74, 1822. Ver especialmente a nota 1 na p. 60.

9 AMPÈRE, A.-M. Théorie Mathématique des Phénomènes Électro-dynamiques Uniquement Déduite de l'Expérience. Sceaux: Éditions Jacques Gabay, 1990, p. 285-286.

10 VOLTA, A. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. Philosophical Transactions, v. 90, p. 403-431, 1800. Carta em francês de A. Volta para J. Banks, datada de 20 de março de 1800. Ela foi lida perante a Royal Society em 26 de junho de 1800. Este artigo está publicado no original em francês, com apenas o título em inglês.

11 Nome que Oersted atribuía ao que hoje chamamos de corrente elétrica. ØRSTED, op. cit.

12 BLONDEL, C. A.-M. Ampère et la Création de l'Électrodynamique (1820-1827). Paris: Bibliothèque Nationale, 1982. p. 73.

13 ØRSTED, op. cit

.

14 FRANKSEN, O. I. H. C. Ørsted – A Man of the Two Cultures. Berkerød: Strandbergs Forlag, 1981. p. 32.

15 Ørsted, H. C. Thermo-electricity. In: FRANKSEN, op.cit., p. 542-580, especialmente p. 568.

16 BIOT, J.-B. e SAVART, F. Note sur le Magnétisme de la pile de Volta. In: Annales de Chimie et de Physique, v. 15, p. 222-223 (1820). Disponível em: <http://www.ampere.cnrs.fr>. Acessado em 21 mar. 2007.

17 BIOT, J. B. Précis élémentaire de Physique. Paris: Deterville, 1824. Terceira edição. v. II, p. 704-723. Reimpresso em JOUBERT, J. (Editor). Collection de Mémoires relatifs a la Physique. Paris: Gauthier Villars, 1885, v. II, p. 80-127. Citado das páginas 90, 97, 113 e 114 de JOUBERT.

18 BIOT, J. B. Précis élémentaire de Physique. Paris: Deterville, 1821. Segunda edição. v. II, p. 123. Reproduzido em JOUBERT, op. cit., p. 116-117.

19 BIOT, 1824, op. cit. Citado das páginas 119 e 120 de JOUBERT.

20 BLONDEL, op. cit., p. 18.

21 Ibid., p. 52.

22 Ibid., p. 105.

23 AMPÈRE, 1990, op. cit., p. 279-281.

24 Ibid., p. 177-178.

25 [N. T.] A expressão eletromotriz é devida a Volta, indicando uma força motora sobre as cargas elétricas no interior de sua pilha, que chamou de "aparelho eletro-motor" em seu artigo original. VOLTA, op. cit.

26 [N. T.] Na versão impressa aparece a expressão "cette action" em vez de "l'action électromotrice." Mas em uma errata que aparece na p. 223 dos Annales de Chimie et de Physique, v. 15, 1820, chama-se a atenção que o correto é esta última expressão.

27 [N. A. 1] Quando esta separação é devida a uma simples interrupção dos corpos condutores, é ainda por um corpo não-condutor, pelo ar, que são separados.

28 [N. T.] Na versão impressa aparece a expressão "l'action électromotrice" em vez de "cette action." Mas em uma errata que aparece na p. 223 dos Annales de Chimie et de Physique, v. 15, 1820, chama-se a atenção que o correto é esta última expressão.

29 [N. A. 2] Este caso inclui aquele no qual os dois corpos, ou sistemas de corpos entre os quais se estabelece a ação eletromotriz, estão em comunicação completa com o reservatório comum que fará então parte do circuito.

30 [N. T.] No caso da pressão Ampère está se referindo à piezoeletricidade, que é a capacidade de alguns cristais de se polarizar eletricamente ao serem submetidos a uma pressão mecânica, gerando com isto uma tensão elétrica. O efeito inverso também ocorre. Isto é, caso estes cristais sejam submetidos a uma tensão elétrica externa, eles se deformam mecanicamente.

31 [N. T.] Maxwell apresenta a seguinte descrição deste fenômeno: "Certos cristais de turmalina, e de outros minerais, possuem aquilo que pode ser chamado de Polaridade Elétrica. Suponha que um cristal de turmalina tenha uma temperatura uniforme, e que esteja aparentemente livre de eletrificação em sua superfície. Suponha que sua temperatura é elevada agora, com o cristal permanecendo isolado. Com isto se observará que uma extremidade ficara eletrificada positivamente e a outra extremidade negativamente. Suponha que a superfície perde esta aparente eletrificação por meio de uma chama ou de alguma outra maneira, então, se o cristal ficar ainda mais quente, vai aparecer eletrificação do mesmo tipo que antes, mas se o cristal for resfriado, a extremidade que havia ficado positiva quando o cristal foi aquecido ficará negativa. Estas eletrificações são observadas nas extremidades dos eixos cristalográficos". MAXWELL, J. C. A Treatise on Electricity and Magnetism. New York: Dover, 1954. v. 1, §60, p. 61-62.

32 [N. T.] Na versão impressa aparece a expressão "voltaïques" em vez de "des courants électriques". Mas em uma errata que aparece na p. 223 dos Annales de Chimie et de Physique, v. 15, 1820, chama-se a atenção que o correto é esta última expressão.

33 [N. A. 3] Quando a pilha está isolada, esta diferença é a soma das duas tensões, uma positiva e a outra negativa. Quando uma das suas extremidades que se comunica com o reservatório comum tem uma tensão nula, a mesma diferença tem um valor absoluto igual à da tensão da outra extremidade.

34 [N. T.] Ampère acredita que as tensões da pilha desaparecem ou tornam-se muito pequenas quando se fecha o circuito e uma corrente elétrica passa a circular por ele. Desde os trabalhos de Ohm em 1826, considera-se este ponto de vista de Ampère como sendo errado. Isto é, ao fechar o circuito, a tensão entre os terminais da pilha não desaparece, pelo menos enquanto a pilha não estiver gasta, mas causa a circulação da corrente elétrica ao longo do circuito fechado. Ver ainda BLONDEL, op. cit., p. 81-82.

35 [N. T.] O modelo de corrente elétrica adotado por Ampère é de certa forma similar ao defendido por Oersted em seu artigo de 1820 e que chamou de "conflito elétrico". Ou seja, no interior de um fio com corrente haveria dois fluxos de carga, um de cargas positivas e outro de cargas negativas, circulando dentro do mesmo condutor em direções opostas.

36 [N. T.] É interessante observar que Ampère já admite a possibilidade de uma inércia dos fluidos elétricos. Muitos anos depois começará a ser mencionado que cada partícula carregada elementar possui não apenas uma carga elétrica, mas também uma massa inercial. Pelo que vemos por esta frase, Ampère já antevia esta possibilidade.

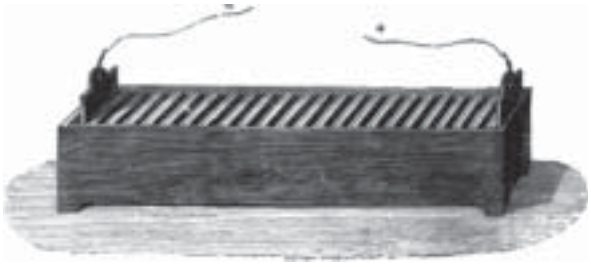
37 [N. T.] Até os dias atuais é mantida esta concepção para o sentido da corrente elétrica. Mesmo quando se assume que apenas os elétrons negativos se deslocam em um condutor metálico comum ligado a uma bateria, o sentido atribuído à corrente elétrica é o sentido oposto ao do movimento dos elétrons.

38 [N. T.] Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850) e Louis Jacques Thenard (1777-1857). Entre outras contribuições para o ramo da físico-química, aprofundaram em torno de 1808 os estudos a respeito da pilha galvânica, utilizando-a para investigar o potássio, o sódio, o boro e publicando seus resultados no livro Recherches physico-chimiques em 1811.

39 [N. T.] Ampère é sempre muito cuidadoso ao definir os conceitos e as nomenclaturas. Todo ímã possui dois pólos. O que ele chama de pólo austral é o que aponta para o norte geográfico terrestre. A palavra "austral" é um adjetivo que se refere às coisas que ficam do lado sul da terra. Como pólos de mesmo tipo se repelem e pólos de tipos opostos se atraem, a origem desta nomenclatura é a de que o pólo austral de um ímã é homólogo ao pólo sul magnético da terra, pelo qual é repelido. O outro pólo é o boreal. Na linguagem de hoje em dia dizemos que um ímã possui um pólo norte (pólo austral), que aponta para o pólo norte geográfico da terra, e um pólo sul (pólo boreal), que aponta para o pólo sul geográfico da terra. Com esta nomenclatura atual vem então que a terra possui um pólo sul magnético localizado perto de seu pólo norte geográfico, e um pólo norte magnético localizado perto de seu pólo sul geográfico.

40 [N. A. 4] Para que esta experiência não deixe nenhuma dúvida sobre a ação da corrente que está dentro da pilha, convém fazer como eu fiz com uma pilha de calha cujas placas de zinco estejam soldadas com as de cobre por toda a extensão de uma de suas interfaces, e não simplesmente em uma parte do metal que se poderia considerar com razão como uma porção condutora.

41 [N. T.] Para entender esta experiência de Ampère, deve-se lembrar que a bateria que ele estava utilizando é do tipo das pilhas de calha ou de tina ("trough battery" em inglês, ou "pile à auges" em francês). Estas baterias resultaram de um desenvolvimento da pilha de Volta, feito realizado por William Cruickshank em torno de 1802. A seção reta de uma bateria destas pode ter, por exemplo, uns 20 cm por 20 cm, com o comprimento podendo ser de uns 60 cm. Portanto é simples colocar uma pequena bússola ou agulha imantada sobre esta bateria para então verificar seu desvio em relação ao meridiano magnético terrestre quando flui uma corrente pelo interior da bateria. Com esta experiência de Ampère se obtém a direção da corrente não apenas no condutor ligando os pólos da bateria, mas também no interior da bateria. Com isto se conclui que ao longo do condutor ela flui do terminal positivo da bateria para o terminal negativo, enquanto que dentro da pilha ela flui do terminal negativo para o terminal positivo. Esta não é uma conclusão trivial. Vamos supor, por exemplo, que a bateria fosse substituída por um capacitor carregado composto de duas placas paralelas. Ao ligarmos estas placas por um condutor ligando as faces internas do capacitor enquanto que, simultaneamente, as faces externas do capacitor são ligadas por um outro condutor, viria que as correntes nos dois condutores fluiria da placa positiva para a placa negativa. Ou seja, no condutor interno deste exemplo a corrente flui no sentido contrário ao da corrente no interior da pilha. A conclusão que se tira então da descoberta de que no interior de uma bateria ligada a um circuito a corrente flui do pólo negativo para o positivo é de que estão atuando forças de origem não eletrostática no interior da bateria, ver VARNEY, R. N. e FISHER, L. H., Electromotive force: Volta's forgotten concept. American Journal of Physics, v. 48, p. 405-408, 1980.



42 [N. T.] Sobre este assunto Oersted descreve a corrente elétrica como se propagando "por um tipo de contínua decomposição e recomposição, ou melhor, por uma ação que perturba o equilíbrio em cada momento, e o reestabelece no instante seguinte. Pode-se exprimir essa sucessão de forças opostas que existe na transmissão da eletricidade, dizendo que a eletricidade sempre se propaga de modo ondulatório". Esta é uma citação de 1812 feita por Oersted, citada em MARTINS, R. d. A. Ørsted e a descoberta do eletromagnetismo. In: Cadernos de História e Filosofia da Ciência, v. 10, p. 89-114, 1986. p. 96.

43 [N. T.] Na Figura 1 de Ampère, o fio fixo no laboratório é representado por AB. O fio móvel é representado por XCDY. O contrapeso é representado por VH. A parte móvel pode girar ao redor do eixo XY. Com o contrapeso podemos alterar a distância entre o eixo XY de rotação e o centro de gravidade do sistema móvel (composto pelo contrapeso mais a parte móvel XCDY). Quanto mais próximo do eixo de rotação estiver o centro de gravidade deste sistema móvel, mais sensível será a balança. Isto é, maior será o ângulo de equilíbrio com o qual ela se afastará do plano vertical quando estiver sob a ação de alguma força horizontal exercida pelo fio fixo, força esta de atração ou de repulsão.

44 [N. T.] J. Lühr construiu recentemente uma réplica da balança de Ampère. Para conseguir ver este efeito de dois fios chegarem a se tocar, teve de utilizar correntes acima de 30A! Ver LÜHR, J. Die Entstehung eines Demonstrationsexperiments: Zur Geschichte der Ampère'schen Stromwaage. In HEERING, P., RIEâ, F. e SICHAU, C. (Orgs.). Im Labor der Physikgeschichte – Zur Untersuchung historischer Experimentalpraxis. Oldenburg: BIS der Carl von Ossietzky, 2000, p. 135-156; especialmente p. 151.

45 [N. T.] O fenômeno eletrostático que Ampère está descrevendo aqui pode ser facilmente observado. Inicialmente construímos um pêndulo eletrostático no qual um pequeno pedaço de papel ou de papel alumínio está dependurado por um fio isolante (de seda ou de nylon). Ao aproximarmos uma régua de plástico atritada do papel, observa-se que inicialmente ele é atraído pela régua, a toca e então passa a ser repelido por ela. A explicação para a atração inicial é que a régua atritada cria uma polarização elétrica no papel. Ele é então atraído pela régua. Ao tocá-la ocorre uma transferência de cargas da régua para o papel, que passa a adquirir uma carga líquida de mesmo sinal que a carga da régua. Com isto o papel passa a ser repelido pela régua.

46 [N. T.] Dois pontos devem ser observados aqui. O primeiro ponto é que até esta época Ampère era o único que fazia experiências diretas de atração e repulsão entre fios com corrente. Logo se tem a impressão, por esta passagem, que ele realizou experiências com os condutores conduzindo corrente envoltos tanto pelo ar quanto pelo vácuo. Mas não encontramos descrições de Ampère destas experiências de condutores interagindo no vácuo. Provavelmente ele nunca realizou experiências assim, apesar do que disse nesta passagem. O segundo ponto a ser observado se refere à distinção que ocorre na atração entre condutores carregados quando estão envoltos pelo ar ou pelo vácuo. Ele aqui está se referindo à rigidez dielétrica de um meio, ou seja, a resistência do meio em relação a ocorrer uma descarga ou arco elétrico. Na pressão atmosférica o ar seco se comporta como um isolante, já que é necessário um grande campo elétrico da ordem de 3×10^6 V/m para que ocorra uma ruptura dielétrica no ar, fazendo com que um isolante carregado eletricamente seja descarregado por um arco elétrico. Esta rigidez dielétrica diminui com a pressão até cerca de 1/1000 de uma atmosfera, quando então começa a crescer rapidamente, ver HEILBRON, J. L. Electricity in the 17th and 18th Centuries– A Study in Early Modern Physics. New York: Dover, 1999. p. 207. As bombas de vácuo na época de Ampère ainda não haviam alcançado pressões tão baixas quanto um milésimo da pressão atmosférica, logo, ainda não se conhecia este aumento brusco da rigidez dielétrica do ar para pressões extremamente baixas. Portanto o "vácuo" da época de Ampère se comportava como um bom condutor, tal que qualquer corpo que fosse carregado por atrito ou por outro meio seria logo descarregado por faíscas ou centelhas. Não era então possível observar na época de Ampère as atrações e repulsões eletrostáticas usuais caso os corpos estivessem no "vácuo". Era comum nesta época considerar-se que era o ar que conseguia segurar as cargas em um corpo carregado mantido na pressão atmosférica. Hoje em dia sabe-se que o ar em pressões abaixo de um milésimo de uma atmosfera comporta-se como um excelente isolante, logo, o que mantém as cargas elétricas na superfície de corpos carregados eletricamente em pressões tão baixas devem ser forças de contato oriundas do próprio corpo carregado, e não exercidas pelo ar extremamente rarefeito ao seu redor.

47 [N. T.] Refere-se a P. S. Laplace (1749-1827), como mencionará mais adiante no artigo.

48 [N. A. 5] Após a redação desta Memória, soube pelo Sr. Arago que este telégrafo já tinha sido proposto pelo Sr. Soemmering. Porém, em vez de observar a mudança de direção das agulhas imantadas, que até então não era conhecida, o autor propunha observar a decomposição da água em tantos recipientes quantas são as letras.

49 N. A. 6, com palavras dos tradutores entre colchetes] O pólo que na agulha imantada se orienta para o norte [geográfico terrestre]. Ele está à direita das correntes que compõem o ímã, porque está à esquerda de uma corrente externa à agulha na mesma direção; e que lhe faz face.

Artigo recebido para publicação em 09/2006.
Aprovado para publicação em 04/2007.